

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **ZAVRŠNI RAD**

**Vjekoslav Sraga**

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **Inventar emisija generalne avijacije na osnovu proširenja registra zrakoplova RH**

Mentor:

Prof. dr. sc. Zoran Lulić, dipl. ing. stroj.

Student:

Vjekoslav Sraga

Zagreb, 2017.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Zoranu Luliću, dipl. ing. stroj. na pruženoj pomoći, savjetima i utrošenom vremenu tijekom izrade ovog rada te doc. dr. sc. Aniti Domitrović i studentima Dini Bajlu i Igoru Šepetu s Fakulteta prometnih znanosti na pruženim informacijama o dnevniku letenja Hrvatskog zrakoplovnog nastavnog središta.

Vjekoslav Sraga



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**  
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija zrakoplovstva



Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Vjekoslav Sraga**

Mat. br.: 0035191423

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Emisije iz generalne avijacije u Republici Hrvatskoj**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Emissions from General Aviation in the Republic of Croatia**

Opis zadatka:

Republika Hrvatska kao i sve ostale države članice EU ima obvezu prikupljati, obraditi i dostaviti Europskoj agenciji za okoliš (EEA) podatke o emisijama iz pojedinih izvora odnosno sektora. Taj se postupak naziva inventar emisija (engl. *Emission Inventory*). Dosadašnji inventari emisija su za RH u pravilu rađeni Tier1 metodom, a u specifična područja kao što su emisije od necestovnih pokretnih strojeva (engl. *Non Road Mobile Machineries*) ili emisije iz aviona se zbog nedostatka podataka uglavnom nije ulazilo.

Prema javno dostupnom registru zrakoplova u Republici Hrvatskoj je registrirano približno 400 zrakoplova. Registar civilnih zrakoplova Republike Hrvatske obuhvaća sve vrste zrakoplova, a u okviru rada treba se ograničiti samo na avione koji su namijenjeni generalnoj avijaciji.

Velika većina tih zrakoplova je poprilično stare konstrukcije i u pravilu su opremljeni klipnim motorima s unutarnjim izgaranjem većih radnih volumena, bez ikakvih naprednih sustava upravljanja radom motora kao i bez sustava za naknadnu obradu ispušnih plinova, tako da su njihove emisije često i za dva reda veličine veće od emisija iz suvremenih cestovnih motornih vozila.

U okviru završnog rada potrebno je:

- Objasniti što je inventar emisija, te kako ga se izrađuje.
- Izraditi detaljnu analizu registra civilnih zrakoplova RH.
- Od nekoliko operatera (uz pomoć mentora) zatražiti podatke o obavljenim letovima.
- Analizirati podatke o obavljenim letovima te statistički definirati najčešći uzorak uobičajenog leta.
- Na osnovu tipičnog načina uporabe izraditi nekoliko različitih scenarija eksploatacije.
- Uporabom preporučenih emisijskih faktora dostupnih u literaturi (EEA, HBEFA) odrediti ukupne emisije od generalne avijacije u RH u protekloj godini.

Pri izradi se treba pridržavati pravila za izradu završnog rada. U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

30. studenog 2016.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Zoran Lulić

Rok predaje rada:

1. rok: 24. veljače 2017.

2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2017.

3. rok: 22. rujna 2017.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 27.2. - 03.03. 2017.

2. rok (izvanredni): 30. 06. 2017.

3. rok: 25.9. - 29. 09. 2017.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Ivica Smojver

**SADRŽAJ**

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	II
POPIS TABLICA .....	III
POPIS OZNAKA I KRATICA .....	IV
SAŽETAK.....	V
SUMMARY .....	VI
1. UVOD.....	1
2. ANALIZA PODATAKA.....	2
2.1. Analiza Hrvatskog registra civilnih zrakoplova .....	2
2.2. Analiza dnevnika letenja .....	6
3. PRORAČUN EMISIJA .....	10
3.1. Emisijski faktori.....	10
3.2. Primjer proračuna za jedan zrakoplov.....	11
4. REZULTATI.....	16
4.1. Godišnje emisije zrakoplova flote HZNS-a.....	16
4.2. Ukupne emisije zrakoplova generalne avijacije u RH .....	19
4.3. Potrošnja goriva i emisije olova.....	21
4.4. Izračun prosječnih emisijskih faktora i usporedba sa suvremenim cestovnim vozilima .....	23
5. ZAKLJUČAK.....	26
LITERATURA .....	27

**POPIS SLIKA**

Slika 1. Vrste klipnih motora u Hrvatskom registru civilnih zrakoplova .....	3
Slika 2. Operateri zrakoplova razvrstani prema broju zrakoplova u floti.....	5
Slika 3. Ukupno vrijeme naleta i broj LTO ciklusa podijeljenih u dva profila leta .....	6
Slika 4. Prosječan profil leta u školskim krugovima .....	7
Slika 5. Prosječni profil leta na ruti .....	8
Slika 6. Shematski prikaz izračuna emisija za jedan zrakoplov.....	15
Slika 7. Prosječne godišnje emisije zrakoplovnih motora u floti HZNS-a .....	19
Slika 8. Procjena ukupnih emisija zrakoplova generalne avijacije u RH opremljenih klipnim motorima – na temelju prosječne emisije motora.....	19
Slika 9. Procjena ukupnih emisija zrakoplova generalne avijacije u RH opremljenih klipnim motorima – na temelju izračuna emisijskih faktora za sve korištene motore ...	21
Slika 10. Potrošnja goriva AVGAS 100LL.....	22
Slika 11. Usporedba emisijskih faktora suvremenog automobila i zrakoplova generalne avijacije .....	24

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Trajanje pojedine faze u ciklusu leta u školskim krugovima s pridruženom postavkom snage motora.....	8
Tablica 2. Trajanje pojedine faze u ciklusu leta na ruti s pridruženom postavkom snage motora .....	9
Tablica 3. Emisijski faktori i potrošnja goriva za motor Lycoming O-320 kroz različite faze leta [kg/hr] [11] .....	10
Tablica 4. Nalet zrakoplova 9A-DAD podijeljen u faze.....	12
Tablica 5. Emisijski faktori i potrošnja goriva za motor Lycoming IO-360 kroz različite faze leta [kg/hr] [11] .....	13
Tablica 6. Emisije onečišćivača zraka i potrošnja goriva za zrakoplov Cessna 172R, 9A-DAD u letovima na ruti u 2016. godini[kg/god] .....	13
Tablica 7. Emisije onečišćivača zraka i potrošnja goriva za zrakoplov Cessna 172R, 9A-DAD u letovima u školskim krugovima u 2016. godini[kg/god].....	14
Tablica 8. Podijeljeno vrijeme naleta zrakoplova [hh:mm] .....	16
Tablica 9. Vrijeme provedeno u taxiranju u jednoj godini .....	17
Tablica 10. Emisije i potrošnja goriva pojedinih zrakoplova te emisije i potrošnja goriva cijele flote HZNS-a [kg/god].....	18
Tablica 11. Primjer procjene nepoznatih emisijskih faktora i potrošnje goriva.....	20

## POPIS OZNAKA I KRATICA

Oznaka	Jedinica	Opis
AMSL		visina iznad srednje razine mora (engl. <i>Above Median Sea Level</i> )
AGL		visina iznad terena (engl. <i>Above Ground Level</i> )
CO		ugljikov monoksid
CO <sub>2</sub>		ugljikov dioksid
EEA		Europska agencija za okoliš (engl. <i>European environment agency</i> )
EMEP		Program za praćenje i evaluaciju onečišćivača zraka (engl. <i>The European Monitoring and Evaluation Programme</i> )
EU		Europska unija
FPZ		Fakultet prometnih znanosti
HACZ		Hrvatska agencija za civilno zrakoplovstvo
HC		ugljikovodici
HZNS		Hrvatsko zrakoplovno nastavno središte
IC		Unutrašnje izgaranje (engl. <i>Internal Combustion</i> )
LTO		slijetanje i polijetanje (engl. <i>Landing and Take-Off</i> )
NO		dušikov monoksid
NO <sub>2</sub>		dušikov dioksid
NO <sub>x</sub>		dušikovi oksidi
Pb		olovo
SO <sub>2</sub>		sumporov dioksid
USS		uzletno-sletna staza
$E_C$	kg	emisije u letovima u školskim krugovima
$E_I$	kg	emisije <i>I</i> -te onečišćujuće tvari
$E_R$	kg	emisije u letovima na ruti
$m_{Pb}$	kg	masa olova
$m_{Pb,gorivo}$	gPb/L <sub>goriva</sub>	sadržaj olova u litri goriva
$w_{Pb}$	gPb/kg <sub>goriva</sub>	maseni udio olova u gorivu
$\rho_{gorivo}$	kg/L	gustoća goriva



## SAŽETAK

Pristupom u Europsku uniju, Republika Hrvatska se obvezala na prikupljanje, obradu i objavu podataka o emisijama štetnih plinova iz različitih izvora u obliku tzv. inventara emisija. Zbog nedostatka podataka, posebne podgrupe kao što su emisije iz zrakoplova, nisu detaljno analizirane. Emisije iz zrakoplova generalne avijacije u Republici Hrvatskoj procijene su koristeći preporučene emisijske faktore iz literature objavljene od strane Europske agencije za okoliš i njena Programa za praćenje i evaluaciju onečišćivača zraka. Zbog starosti istraživanih zrakoplova i njihovih motora s unutarnjim izgaranjem, emisije nekih štetnih plinova mogle bi biti i nekoliko puta veće, uspoređujući ih s emisijama suvremenih cestovnih vozila.

Ključne riječi: inventar emisija, onečišćivači zraka, emisijski faktori, generalna avijacija

## **SUMMARY**

All EU member states are obligated to collect, process and deliver data about emissions from different sources in the form of so-called Emission Inventory. Because of lack of data, specific subareas like emissions from aircraft were not in depth analysed. Within this research, register of civil aircraft of the Republic of Croatia and available flight data were analysed. Using recommended emission factors from the literature (EMEP/EEA), emissions from general aviation aircraft in Croatia were assessed. Because of the age of the investigated aircraft and their IC engines, some of emissions could be easily bigger for two orders of magnitude, compared to up-to-date road vehicles.

Key words: Emission Inventory, air pollutants, emission factors, general aviation

## 1. UVOD

Staklenički plinovi i onečišćivači zraka negativno utječu na klimu i zdravlje ljudi. Stoga ne čudi sve veća zabrinutost znanosti i ljudi u cijelom svijetu oko emisija tih tvari u okoliš iz raznih izvora. U ovom radu analizirati će se emisije ugljičnog monoksida, ugljikovodika, dušikovih oksida, sumporovih oksida te olova iz zrakoplovnih klipnih motora zrakoplova generalne avijacije. Ugljikov monoksid je vrlo otrovan plin bez boje i mirisa. Izloženost čovjeka tom plinu uzrokuje smanjenje protoka kisika u krvožilnom sustavu. Zajedno s ugljikovodicima uzrokuje stvaranje otrovnog ozona i smoga u blizini tla. Ozon iritira oči, oštećuje pluća i pojačava respiratorne probleme. Pod dušikovim oksidima ( $\text{NO}_x$ ) razlikujemo bezbojan dušikov monoksid ( $\text{NO}$ ) te crveno-smeđi vrlo otrovan i reaktivan dušikov dioksid ( $\text{NO}_2$ ). Te tvari i sumporov dioksid ( $\text{SO}_2$ ) doprinose štetnom kiseljenju i eutrofikaciji voda i tla [1]. Olovo ( $\text{Pb}$ ) je poznat onečišćivač zraka koji može dovesti do raznih štetnih zdravstvenih utjecaja, uključujući neurološke utjecaje na djecu koji mogu prouzročiti probleme u ponašanju i učenju te smanjenje inteligencije. [2]. Inventar emisija je dokument koji sažima količinu tih onečišćivača zraka iz različitih izvora. Mogu sadržavati onečišćivače iz različitih tipova izvora kao i različitu veličinu obuhvaćenog područja. Najčešći tip je inventar emisija određene zemlje, često podijeljen u manje dijelove prema tipu izvora onečišćenja, tzv. sektore. Do sada, inventar emisija u Republici Hrvatskoj izrađen je TIER 1 metodom [3]. Ta metoda je bazirana na potrošnji goriva za određeni proces izgaranja, a omogućuje brzu analizu mnogo različitih sektora. Nažalost, let zrakoplova je iznimno kompleksna aktivnost, a neke od varijabli koje utječu na emisije iz zrakoplovnih motora su tip motora te brzina i visina leta zrakoplova. Drugi utjecajni faktori ovise o fazama leta koje trebaju biti točno određene prema uobičajenim putanjama leta. Potrošnja goriva i emisije štetnih plinova variraju od taxiranja na aerodromu, pa preko polijetanja, penjanja, krstarenja te sve do prilaza i slijetanja na kraju. Nadalje, neki zrakoplovi odlete nekoliko takvih ciklusa npr. u sat vremena, dok drugi obave jedan ciklus u dva i više sata leta. To ovisi o glavnom cilju i zadatku određenog zrakoplova i/ili određenog leta.

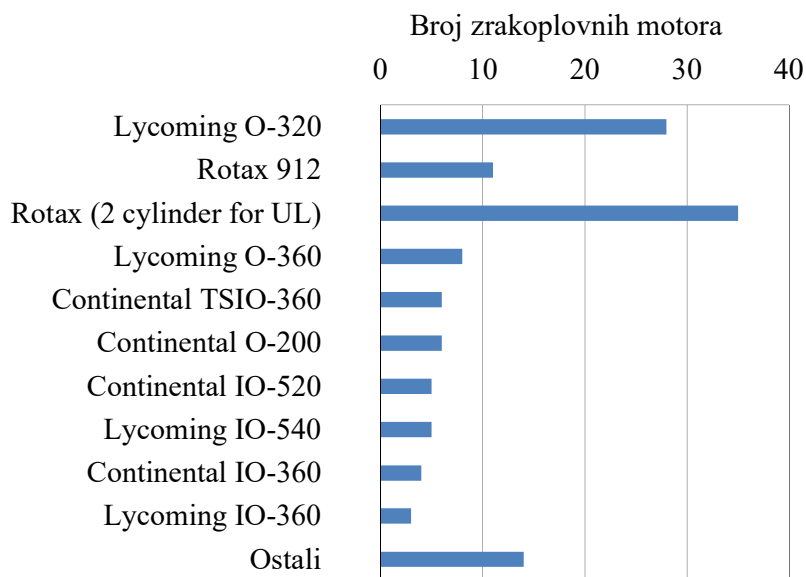
## 2. ANALIZA PODATAKA

### 2.1. *Analiza Hrvatskog registra civilnih zrakoplova*

Na početku ovog istraživanja, važno je odrediti stvaran broj zrakoplova generalne avijacije u Republici Hrvatskoj. U tu svrhu, analiziran je Registar civilnih zrakoplova u Republici Hrvatskoj [4]. Na prvi pogled, Registar se čini loše organiziran i siromašan podacima. Iznenadjuća je brojka od otprilike 400 zrakoplova u Registru. U razgovoru s osobama čiji je posao vezan za generalnu avijaciju, stvarni očekivani broj trenutno aktivnih i plovidbenih zrakoplova generalne avijacije bi trebao biti svega stotinjak zrakoplova. To znači da Registar treba detaljno obraditi kako bi se iz njega dobili točniji podaci. U Republici Hrvatskoj, Registar civilnih zrakoplova čuva i obrađuje Hrvatska agencija za civilno zrakoplovstvo (HACZ). Obrada Registra koju vrši agencija uključuje unos zrakoplova u Registar, unos i promjenu relevantnih podataka o zrakoplovu te brisanje zrakoplova iz Registra [5]. Registar je javno dostupan za preuzimanje na službenim mrežnim stranicama Agencije, koja izdaje novu verziju Registra početkom svakog kalendarskog mjeseca. Sam Registar sastoji se od liste registriranih zrakoplova poredanih po abecednom redu registarske oznake. Ostali podaci o zrakoplovu u Registru su redni broj u registru, proizvođač i proizvođačeva oznaka zrakoplova, serijski broj zrakoplova, vlasnik te adresa vlasnika zrakoplova. Ti podaci nisu dovoljni za provedbu ovog istraživanja. Podatak koji nedostaje je status zrakoplova, npr. status plovidbenosti zrakoplova, te drugi, najvažniji podatak za ovo istraživanje – vrsta, proizvođač i model pogonskog sustava zrakoplova. Jasno je kako je prvi zadatak istraživanja prikupiti te dodatne podatke koji će omogućiti potpunu i točnu analizu, čineći Registar korisnim koliko god je moguće.

Verzija Registra iz mjeseca listopada 2010. godine [6] korištena je zbog toga jer osim podataka koje sadrži aktualni Registar, ova verzija sadrži i podatke o statusu zrakoplova, pokazujući je li određen zrakoplov aktivan ili neaktivan. Neaktivni zrakoplovi su oni zrakoplovi koji u tom trenutku nisu plovidbeni, što znači da ne mogu provoditi nikakve letove niti ispuštati onečišćivače zraka. Drugi problem s aktualnim Registrom je što sadrži mnogo zrakoplova koji više ne lete, a bili su označeni kako aktivni u Registru iz 2010. godine. Na primjer, može biti da je određen zrakoplov u međuvremenu imao nezgodu ili pak da su istekli resursi konstrukciji zrakoplova pa se isti koristi kao nastavno pomagalo ili je otpisan i rastavljen. Takva vrsta podataka prikupljena je iz

različitih izvora, kao što je mrežna stranica Agencije za istraživanje nesreća u zračnom, pomorskom i željezničkom prometu [7]. Nakon eliminiranja neaktivnih zrakoplova na temelju Registra iz 2010. godine i drugih spomenutih podataka, istraživanje je usmjereno prema određivanju motora pojedinog zrakoplova iz Registra. U tom procesu su pretraživane mrežne stranice proizvođača motora te druga dostupna literatura, npr. Priručnik za određen motor [8]. Taj postupak je pokazao da se u Registru civilnih zrakoplova Republike Hrvatske nalaze zrakoplovi i helikopteri, jedrilice, zmajevi, baloni na vrući zrak, mikro-laki zrakoplovi i eksperimentalne letjelice koje su u probnoj fazi proizvodnje ili popravka. Letjelice koje imaju pogon, opremljene su klipnim, ili u nešto manjem broju, mlaznim motorima. Od svih navedenih kategorija, u fokusu ovog istraživanja su zrakoplovi pogonjeni klipnim motorima kao tipični predstavnik zrakoplova generalne avijacije. Za svaki takav zrakoplov u Registru, određen je proizvođač i model zrakoplovnog klipnog motora, zajedno s dodatnim podacima kao što su obujam motora, nazivna snaga i broj cilindara, što će se koristiti kasnije u istraživanju. Slika 1 prikazuje razvrstavanje motora koje je izvršeno prema broju određenog motora u Registru.

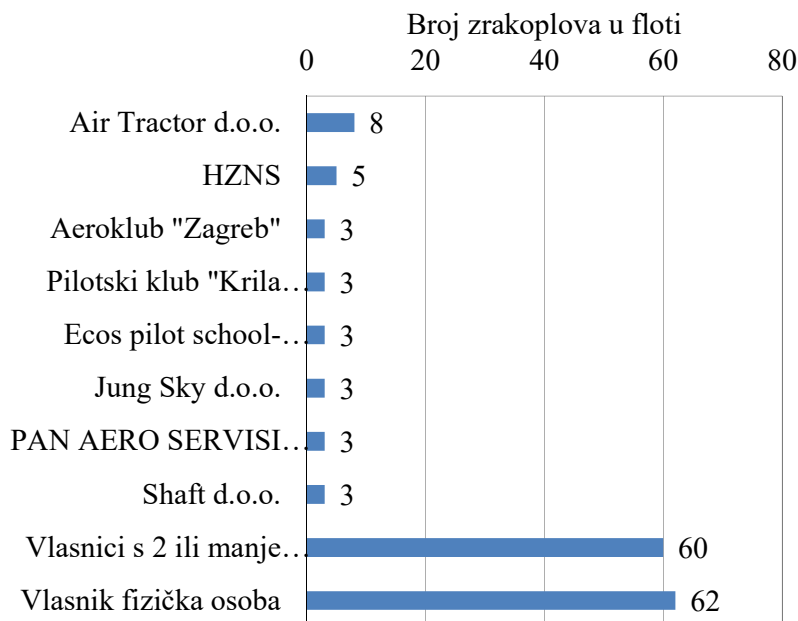


*Slika 1. Vrste klipnih motora u Hrvatskom registru civilnih zrakoplova*

Rezultati pokazuju da je najčešće korišten motor u Republici Hrvatskoj Lycoming O-320 u 28 registriranih zrakoplova. Na drugom mjestu je Rotax 912 motor, zajedno s

drugim modelima Rotax motora, koji mogu biti i dvocilindrični i četverocilindrični, a najčešće se nalaze na mikrolakim zrakoplovima koji dolaze s više opcija motora pa je točno određivanje motora na pojedinom zrakoplovu nemoguće bez pregleda svakog zrakoplova. Za potrebe ovog istraživanja, ti različiti motori su aproksimirani poznatim Rotax 912 motorom. Sljedeći na listi su Lycoming O-360 s 8, Continental TSIO-360 sa 6, Continental O-200 sa 6, Continental IO-520 s 5, Lycoming IO-540 s 5 te Continental IO-360 s 4 pojavljivanja u Registru. Ostali modeli motora s 3 ili manje pojavljivanja prikazani su u slici kao „ostali“. Važno je ovdje napomenuti značenje različitih oznaka zrakoplovnih motora. Na primjer, iz naziva motora Continental TSIO-360 možemo zaključiti kako je proizvođač motora kompanija Continental, a slova i brojke označuju da je motor turbo (T), super-punjeni (S), opremljen s ubrizgavanjem goriva (I) (engl. *fuel injected*), s nasuprotno razmještenim cilindrima (O) (engl. *opposite cylinder*) s obujmom motora od 5899 cm<sup>3</sup> (360 kubičnih inča) [9]. Konačno, analiza je pokazala da je u Republici Hrvatskoj trenutno aktivno otprilike 125 zrakoplovnih klipnih motora s ukupno 17 različitih modela motora.

Nakon analiziranih podataka iz Registra, moguće je odrediti i broj aktivnih operatera zrakoplova. To je važan podatak jer kompletna analiza svakog zrakoplova značila bi prevelik posao u smislu prihvatljivog trajanja ovog istraživanja. Brži način bio bi odabrati reprezentativni uzorak zrakoplova i operatera zrakoplova, čijom analizom bi dobili vjerne rezultate s minimalnom uvedenom greškom. Analiza zrakoplova pokazala je da je Hrvatsko zrakoplovno nastavno središte (HZNS) pri vrhu liste s 5 zrakoplova u vlasništvu (Slika 2). Druga zanimljiva činjenica je da oni koriste 4 različita tipa zrakoplova opremljenih s 4 različita modela motora, u rasponu od sportskih kompozitnih zrakoplova koji mogu primiti dvije osobe, do aluminijskog zrakoplova s 2 motora koji može primiti do 4 osobe.

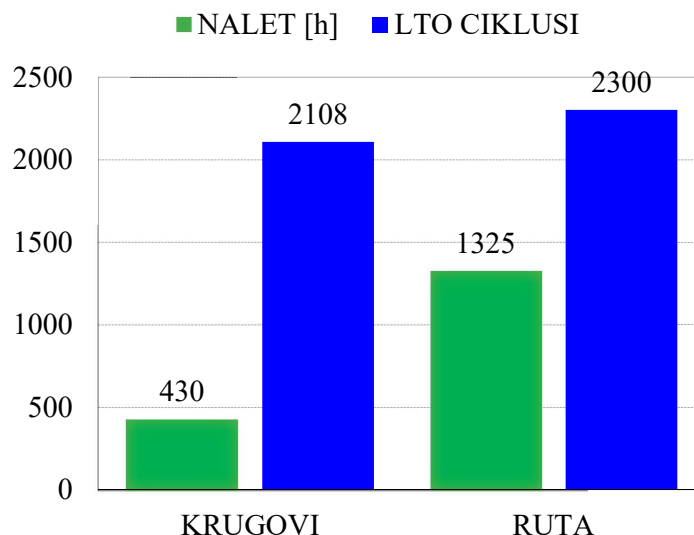


*Slika 2. Operateri zrakoplova razvrstani prema broju zrakoplova u floti*

Nakon kontaktiranja HZNS-a, koje je usko povezano s Fakultetom prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu (FPZ), otkriveno je kako oni također koriste i zrakoplove drugih operatera tijekom mjeseci s najpovoljnijim vremenskim uvjetima za letenje. To znači da za vrijeme najaktivnijih mjeseci u godini, oni koriste ukupno 8 zrakoplova što znači da su prema broju, raznovrsnosti i aktivnosti zrakoplova kvalitetan reprezentativan operater zrakoplova u Republici Hrvatskoj, potreban za ovo istraživanje. HZNS je licencirana organizacija za školovanje pilota koja primarno provodi školovanje pilota za studente studija civilnog pilota pri spomenutom Fakultetu. Pretpostavlja se da je ova organizacija najveća i najaktivnija od svih drugih organizacija za školovanje pilota u Republici Hrvatskoj. HZNS posjeduje sve potrebne licence i dozvole, te je odlično organizirana. To je vidljivo i iz načina na koji prikupljaju, obrađuju i čuvaju podatke o letovima svih zrakoplova koje koriste, u obliku tzv. dnevnika letenja. Ti podaci su detaljno analizirani u ovom istraživanju. Uz pomoć profesora, studenata i instruktora iz HZNS-a i FPZ-a, podaci o letovima razvrstani prema jedinstvenoj oznaci zadatka u određenom letu, objašnjeni su s ciljem određivanja parametara pojedinog leta. Ukupan nalet je tako podijeljen na dva glavna tipa leta – školski krugovi ili let na ruti.

## 2.2. Analiza dnevnika letenja

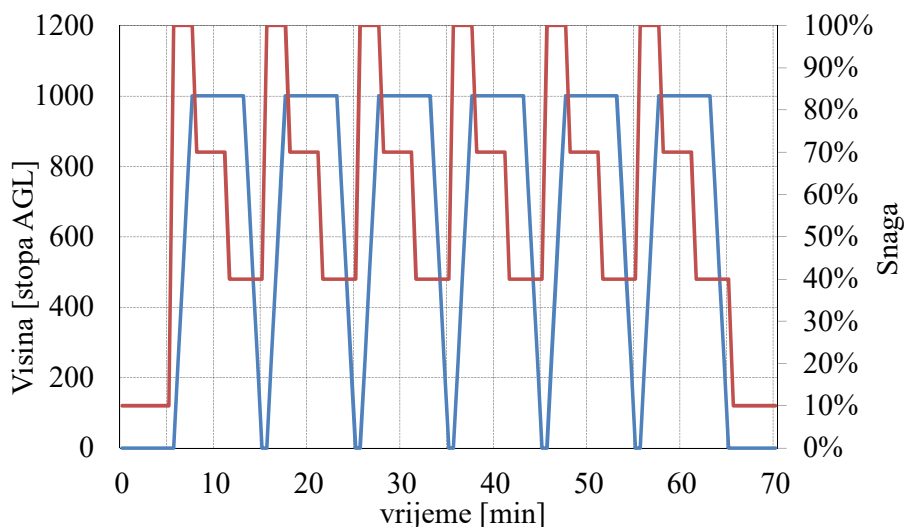
S odabranim reprezentativnim operaterom, daljnja analiza se usmjerava na utvrđivanje aktivnosti i najčešćih uzoraka upotrebe zrakoplova. To je napravljeno na temelju jednogodišnjih podataka o naletu operatera. Analizom tog dnevnika letenja, određeno je prosječno vrijeme leta operatera za potrebe određivanja reprezentativnog leta zrakoplova generalne avijacije u Republici Hrvatskoj. Dva tipična profila leta su određena kao let u školskim krugovima i let na ruti, kao što to prikazuje Slika 3. Ukupno vrijeme naleta i broj ciklusa slijetanja i polijetanja, (engl. *Landing and Take-Off; LTO*) podijeljeno je između tih dvaju profila.



Slika 3. Ukupno vrijeme naleta i broj LTO ciklusa podijeljenih u dva profila leta

Let u školskim krugovima i let na ruti su različiti u više segmenata, a oboje su važni za kvalitetno školovanje budućih pilota. Između ta dva ekstrema je tzv. let u zoni, koji se sastoji od raznih elemenata, nekad sličnih letu u školskim krugovima, a nekad sličniji letu na ruti. Prema tome je i pojedini let u zoni pribrojan jednom od utvrđenih profila, ovisno o zadacima pojedine vježbe u određenom letu u zoni. Uspoređujući dva navedena tipična profila leta, može se zaključiti da je glavno svojstvo leta u školskim krugovima kratko vrijeme potrebno za obavljanje jednog LTO ciklusa, kao što to prikazuje Slika 4.





Slika 4. Prosječan profil leta u školskim krugovima

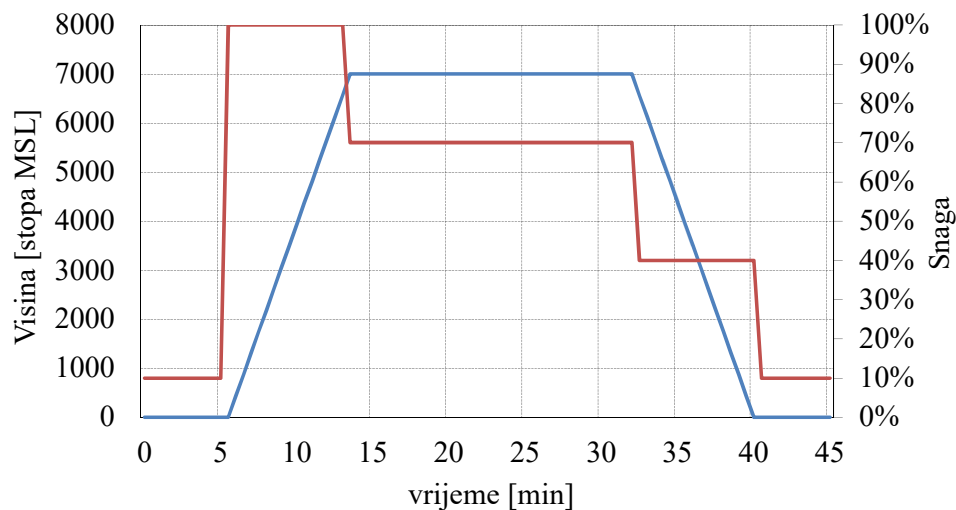
Taj ciklus, koji zrakoplov obavi tijekom jednog punog kruga, počinje s provjerama sustava zrakoplova na tlu. Nakon pokretanja motora, provjerava se i rad motora i sustava vezanih uz motor. To je trenutak u kojem kreće analiza ovog istraživanja. U tom dijelu leta, motor radi s minimalnom snagom, ovdje procijenjenom na 10 %. Nakon završetka svih provjera, slijedi taxiranje zrakoplova po tlu do aktivne uzletno-sletne staze (USS). Provjere na tlu i taxiranje do staze ne moraju biti odrađeni u svakom krugu jer je moguće sletjeti s produžavanjem, u kojem zrakoplov slijeće te odmah nakon dodira sa stazom ponovno ubrzava i polijeće bez zaustavljanja zrakoplova. Polijetanje zrakoplova, bilo nakon taxiranja ili nakon slijetanja s produžavanjem, traje u prosjeku pola minute i izvršava se sa 100 % snage motora, tj. s punom snagom. Nakon polijetanja, zrakoplov s istom postavkom snage penje do visine od 305 metara (1000 stopa) iznad terena (engl. *Above Ground Level; AGL*). Na toj visini krstarenja, pilot smanjuje snagu na otprilike 70 % pune snage, postavljajući zrakoplov u konfiguraciju za krstarenje u horizontalnom letu. U tom trenutku, pilot leti dio kruga koji se zove „niz vjetar“, a pravac mu je paralelan sa stazom, ali u suprotnom smjeru od polijetanja. To znači da je pilot već izvršio dva zaokreta, a prije trećeg zaokreta, smanjuje snagu na otprilike 40 % čime počinje spuštanje zrakoplova. Nakon četvrtog zaokreta počinje završni prilaz u kojem se uzdužna os zrakoplova poravnava sa smjerom USS-a i na kraju slijeće. Nakon slijetanja, pilot usporava zrakoplov te nastavlja taxiranje do mjesta za parkiranje ili pak dodaje punu snagu i započinje novi krug. U ovom istraživanju utvrđeno je da u jednom letu u školskim

krugovima, zrakoplov obavi 6 krugova ili ciklusa. Za prosječno trajanje jednog ciklusa u letu u školskom krugu kod zrakoplova HZNS-a izračunato je oko 10 min. To vrijeme podijeljeno je na polijetanje, penjanje, krstarenje i prilaz, kao što to prikazuje Tablica 1.

*Tablica 1. Trajanje pojedine faze u ciklusu leta u školskim krugovima s pridruženom postavkom snage motora*

	Vrijeme trajanja [min]	Udio u ukupnom vremenu	Prosječna snaga motora
<b>Polijetanje</b>	0,5	5 %	100 %
<b>Penjanje</b>	2	20 %	100 %
<b>Krstarenje</b>	3,5	35 %	70 %
<b>Prilaz</b>	4	40 %	40 %

Drugi tipični profil leta je let na ruti, kojem je cilj putovanje od jednog do drugog aerodroma. Također se sastoji od glavnih dijelova opisanih u prvom profilu, s jednom razlikom – dio leta u krstarenju ovdje se izvodi na većoj visini, obično iznad 1829 metara (6000 stopa) iznad razine mora (engl. *Median Sea Level; MSL*) i traje znatno duže. Odnos visine leta i korištene snage motora u letu na ruti prikazuje Slika 5.



*Slika 5. Prosječni profil leta na ruti*

Prosječno vrijeme trajanja jednog ciklusa u letu na ruti za zrakoplove HZNS-a je 35min. To vrijeme je, slično kao i kod leta u školskim krugovima, podijeljeno na vrijeme u polijetanju, penjanju, krstarenju i prilazu (Tablica 2).

*Tablica 2. Trajanje pojedine faze u ciklusu leta na ruti s pridruženom postavkom snage motora*

	<b>Vrijeme trajanja [min]</b>	<b>Udio u ukupnom vremenu</b>	<b>Prosječna snaga motora</b>
<b>Polijetanje</b>	0,5	1,42 %	100 %
<b>Penjanje</b>	8	22,85 %	100 %
<b>Krstarenje</b>	18,5	52,85 %	70 %
<b>Prilaz</b>	8	22,85 %	40 %

Važno je napomenuti kako je svaki let zrakoplova jedinstven u smislu točno korištene snage u određenom dijelu leta, ovisno o vremenskim uvjetima i masi zrakoplova, putnika i tereta. Ovdje utvrđeni profili određeni su kao srednje statičke vrijednosti bazirane na letovima u cijeloj godini, koje su opisali piloti iz HZNS-a. Detaljnija analiza bi uključila snimanje i bilježenje parametara leta na svakom letu i na svakom zrakoplovu. Razlika u konačnim rezultatima ne bi opravdala kompleksnost takve analize, pa je upotreba ovih dvaju uprosječenih profila za ovo istraživanje logično i najefikasnije u smislu potrebnog vremena i opreme.

### 3. PRORAČUN EMISIJA

#### 3.1. Emisijski faktori

U trećoj fazi izrade rada, prikupljeni su prikladni emisijski faktori. Ti emisijski faktori moraju biti izračunati ili izmjereni, a dostupni su iz pouzdanih izvora kao što su publikacije proizvođača motora ili agencije za okoliš koji izrađuju liste emisijskih faktora mjerenjem emisija onečišćivača zraka određenih procesa izgaranja – u ovom slučaju zrakoplovnih motora. Emisijski faktor je specifični faktor u obliku broja koji povezuje aktivnost promatranog objekta s emisijom štetnih plinova [10]. Primjere emisijskih faktora prikazuje Tablica 3. Prikazane emisijske faktore odredila je Američka Agencija za zaštitu okoliša (engl. *US Environmental Protection Agency*) za motor Lycoming O-320 [11].

Tablica 3. Emisijski faktori i potrošnja goriva za motor Lycoming O-320 kroz različite faze leta [kg/hr] [11]

	Potrošnja goriva	CO	NO <sub>x</sub>	Total HC	SO <sub>x</sub>
<b>Prazan hod</b>	4.30	4.63	0.0022	0.159	0.0
<b>Polijetanje</b>	40.4	43.5	0.088	0.475	0.01
<b>Krstarenje</b>	30.3	29.9	0.120	0.375	0.01
<b>Prilaz</b>	21.1	25.8	0.020	0.406	0.0

Spomenuta aktivnost u slučaju zrakoplova može biti vrijeme rada, postavka snage, potrošnja goriva itd. Osnovna jednadžba za izračun emisije pojedinog onečišćivača zraka je:

$$Emisija = Aktivnost \times Emisijski\ faktor \quad (1)$$

Koristeći ovu metodu, izračunate su emisije promatranog zrakoplova. Nakon što je ta procedura provedena za sve štetne plinove i za cijelu flotu relevantnog operatora, može se napraviti projekcija rezultata na druge operatere i zrakoplove. To će u konačnici voditi do krajnjeg rezultata o ukupnim emisijama iz zrakoplova generalne avijacije u Republici Hrvatskoj. To je provedeno sljedećim jednadžbama:

$$(E_C)_{jl} = \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^n EF_{il} \left[ \frac{kg}{h} \right] \times t_i [h] \quad (2)$$

gdje su  $(E_C)_{jl}$  emisije  $l$ -tog onečišćivača od jednog zrakoplova u dijelu godišnjeg naleta koji se odnosi na let u školskim krugovima.  $EF_{il}$  je emisijski faktor u određenom dijelu leta  $i$ , onečišćivača  $l$ , dok je  $t_i$  vrijeme  $i$ -tog dijela leta. Taj produkt je zbrojen za jedan cijeli krug koji se sastoji od  $n$  faza, te je nakon toga emisija svih  $m$  krugova izračunata. Isto je napravljeno i za dio godišnjeg naleta koji se odnosi na let na ruti prema jednadžbi:

$$(E_R)_{jl} = \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^n EF_{il} \left[ \frac{kg}{h} \right] \times t_i [h] \quad (3)$$

u kojoj su  $(E_R)_{jl}$  godišnje emisije  $l$ -tog onečišćivača iz jednog zrakoplova u letu na ruti. Druge varijable imaju isto značenje kao i u jednadžbi (2). Naposljetku, ukupne emisije  $l$ -tog onečišćivača zraka su izračunate zbrajanjem svih  $o$  istraživanih zrakoplova:

$$E_l = \sum_{j=1}^o ((E_C)_{jl} + (E_R)_{jl}) \quad (4)$$

### 3.2. Primjer proračuna za jedan zrakoplov

Nakon utvrđivanja prikladne metodologije ovog istraživanja, svi potrebni izračuni su provedeni za sve zrakoplove, a ovdje će se detaljno opisati postupak na jednom primjeru, zrakoplovu Cessna 172R u vlasništvu Fakulteta prometnih znanosti, registarske oznake 9A-DAD. Godišnji nalet svakog zrakoplova podijeljen je između letova u školskom krugu i letova na ruti, ovisno o vježbama iz nastavnog programa za pilote koje su se izvodile u određenom letu. Ukupno vrijeme naleta zrakoplova skraćene oznake DAD iznosi 405 sati i 47 minuta. Od toga se 29 sati i 11 minuta odnosi na letove u školskim krugovima, a 376 sati i 36 minuta odnosi se na letove na ruti. U letovima u školskim krugovima zrakoplov je obavio 170 ciklusa. Ranije je utvrđeno da se po jednom letu ili misiji obavi 6 ciklusa, što znači da je zrakoplov odletio ukupno 28 letova ili misija. Pod jednim letom ili misijom smatramo vrijeme između jednog pokretanja zrakoplova s parkirnog mjesta i ponovnog zaustavljanja zrakoplova i motora. Ustanovljeno prosječno

vrijeme taxiranja je 10 minuta po letu, što znači da je zrakoplov DAD u taxiranju po tlu proveo oko 283 minute u protekloj godini u dijelu letova u školskom krugu. U letovima na ruti, isti zrakoplov je ostvario 529 ciklusa. S dva ciklusa po misiji u prosjeku, zrakoplov je ostvario oko 265 misija, tj. 2646 minuta je zrakoplov proveo u taxiranju u dijelu letova na ruti. Podjela vremena prikazana je tablično radi preglednosti (Tablica 4).

*Tablica 4. Nalet zrakoplova 9A-DAD podijeljen u faze*

<b>9A-DAD</b>	<b>Faza leta</b>	<b>Vremenski udio faze u letu</b>	<b>Vrijeme faze u letu</b>
<b>LETOVI NA RUTI</b>	Taxiranje		2646 min
	Polijetanje	1,4 %	285 min
	Penjanje	22,9 %	4560 min
	Krstarenje	52,8 %	10545 min
	Prilaz	22,9 %	4560 min
<b>LETOVI U ŠKOLSKIM KRUGOVIMA</b>	Taxiranje		283 min
	Polijetanje	5 %	73 min
	Penjanje	20 %	294 min
	Krstarenje	35 %	514 min
	Prilaz	40 %	587 min
<b>Σ</b>			<b>405 h 47 min</b>

Izračunato vrijeme po fazama koristi se za izračun emisija korištenjem emisijskih faktora. Navedeni zrakoplov opremljen je motorom Lycoming IO-360. Emisijske faktore tog motora prikazuje Tablica 5 [11]. U taxiranju motor radi u praznom hodu što je dovoljno za kretanje zrakoplova po tlu, pa se emisijski faktori za prazan hod koriste kod izračuna emisija kod taxiranja. Zrakoplovi generalne avijacije najčešće penju sa 100 % snage kao i kod polijetanja pa su emisijski faktori za polijetanje korišteni i za polijetanje i za penjanje.

Tablica 5. Emisijski faktori i potrošnja goriva za motor Lycoming IO-360 kroz različite faze leta [kg/hr] [11]

	Potrošnja goriva	CO	NO <sub>x</sub>	Total HC	SO <sub>x</sub>
<b>Prazan hod</b>	3,68	3,29	0,0042	0,18	0
<b>Polijetanje</b>	46,7	56	0,093	0,469	0,01
<b>Krstarenje</b>	29,3	28,8	0,13	0,24	0,01
<b>Prilaz</b>	16,6	11,5	0,169	0,161	0

Emisije pojedine onečišćujuće tvari te potrošnja goriva kroz faze leta u krugovima tijekom jedne godine, izračunate su prema formuli (2) s navedenim podacima o naletu i emisijskim faktorima. Rezultate tog dijela proračuna prikazuje Tablica 6.

Tablica 6. Emisije onečišćivača zraka i potrošnja goriva za zrakoplov Cessna 172R, 9A-DAD u letovima na ruti u 2016. godini[kg/god]

	Potrošnja goriva	CO	NO <sub>x</sub>	Total HC	SO <sub>x</sub>
<b>Taxiranje</b>	162,2	145,1	0,19	7,9	0
<b>Polijetanje</b>	221,8	267,0	0,44	2,2	0,05
<b>Penjanje</b>	3549,1	4255,8	7,07	35,7	0,76
<b>Krstarenje</b>	5140,5	5061,4	23,57	41,9	1,58
<b>Prilaz</b>	1261,6	874,0	12,84	12,2	0,38
<b>Σ</b>	<b>10335,2</b>	<b>10602,3</b>	<b>44,11</b>	<b>99,9</b>	<b>2,77</b>

Sličan izračun proveden je i za dio naleta koji se odnosi na letove na ruti. Prema formuli (3), s emisijskim faktorima i naletom koji se odnosi na letove na ruti, izračunate su vrijednosti koje prikazuje

Tablica 7.

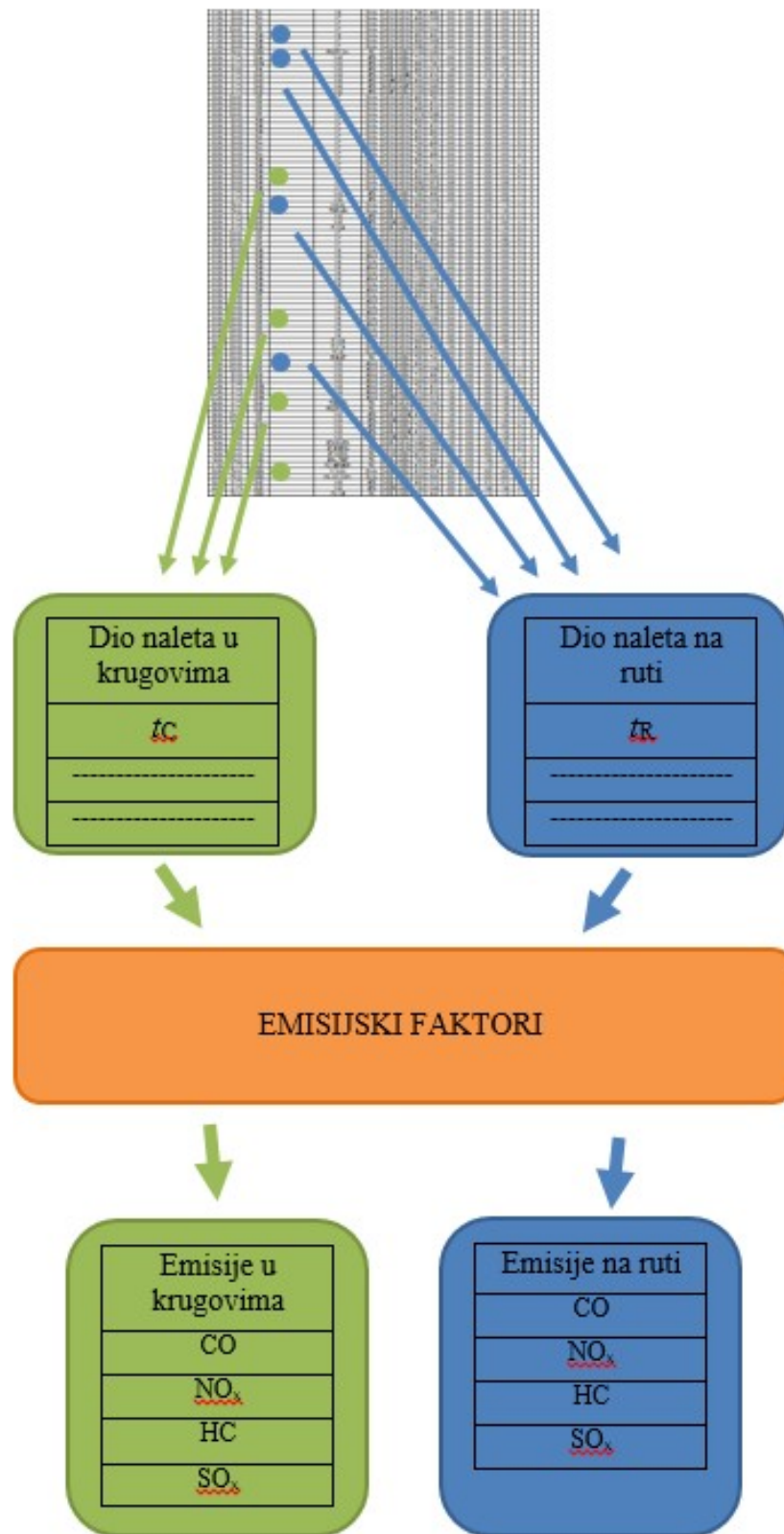
*Tablica 7. Emisije onečišćivača zraka i potrošnja goriva za zrakoplov Cessna 172R, 9A-DAD u letovima u školskim krugovima u 2016. godini[kg/god]*

	<b>Potrošnja goriva</b>	<b>CO</b>	<b>NO<sub>x</sub></b>	<b>Total HC</b>	<b>SO<sub>x</sub></b>
<b>Taxiranje</b>	17,4	15,5	0,02	0,85	0
<b>Polijetanje</b>	57,1	68,5	0,11	0,57	0,01
<b>Penjanje</b>	228,5	274,0	0,46	2,30	0,05
<b>Krstarenje</b>	250,5	246,6	1,15	2,04	0,08
<b>Prilaz</b>	162,5	112,5	1,65	1,58	0,05
<b>Σ</b>	<b>7156</b>	<b>717,1</b>	<b>3,39</b>	<b>7,34</b>	<b>0,19</b>

Opisan postupak za zrakoplov 9A-DAD, proveden je za sve zrakoplove u floti Hrvatskog zrakoplovnog nastavnog središta. Radi preglednosti, postupak za preostalih 7 zrakoplova neće se ovdje opisivati jer je identičan prethodno prikazanom uz druge vrijednosti naleta i emisijskih faktora. Na temelju izračunatih vrijednosti, prosječne emisije po motorima su izračunate te na temelju toga dobivene su ukupne emisije zrakoplova generalne avijacije u Republici Hrvatskoj što će se prikazati u sljedećem poglavlju.

Slika 6 shematski prikazuje tijek izračuna emisija jednog zrakoplova. U prvom koraku se analizira dnevnik letenja, koji je na slici umanjen jer služi kao kvalitativan prikaz izvora podataka. U njemu se pronalaze zapisi letova određenog zrakoplova te se analizom vježbi pojedini let pribraja ili letovima u školskim krugovima ili pak letovima na ruti. Iz tih se iznosa vremena zatim izračunavaju emisije zrakoplova uz pomoć emisijskih faktora, kao što je detaljnije objašnjeno u primjeru proračuna. Ukupne emisije jednog zrakoplova izračunaju se zbrajanjem emisija s letova u školskim krugovima i emisija letova na ruti.





Slika 6. Shematski prikaz izračuna emisija za jedan zrakoplov

## 4. REZULTATI

### 4.1. Godišnje emisije zrakoplova flote HZNS-a

Osnovni podatak za proračun je nalet zrakoplova, pri čemu je važno odrediti koji dio naleta je ostvaren letovima u školskim krugovima, a koji letovima na ruti. Postupak proveden u poglavlju 3.2 za zrakoplov DAD, proveden je i za ostale zrakoplove flote, čime su dobiveni rezultati koje prikazuje Tablica 8.

Tablica 8. Podijeljeno vrijeme naleta zrakoplova [hh:mm]

Oznaka	Krugovi	Ruta	$\Sigma$
<b>DAD</b>	29:11	376:35	405:47
<b>DAS</b>	97:54	235:20	333:15
<b>DIG</b>	39:45	234:39	274:25
<b>DMB</b>	113:59	43:15	157:15
<b>DZG</b>	85:10	157:09	242:20
<b>NIR</b>	28:39	201:35	230:15
<b>PAA</b>	24:03	46:01	70:05
<b>PAB</b>	11:05	29:54	41:00
<b><math>\Sigma</math></b>	<b>429:50</b>	<b>1324:31</b>	<b>1754:22</b>

Kao što je spomenuto, svaki let se sastoji od jednog ili više LTO ciklusa. Za letove u školskim krugovima, prosječan broj ciklusa po letu je 6, dok je za letove na ruti broj ciklusa jednak 2. Ovdje je bitno napomenuti kako se u normalnim procedurama, let na ruti sastoji od samo jednog LTO ciklusa, ali to nije pravilo za organizacije koje se bave školovanjem pilota jer se često za vrijeme leta na ruti obavljaju i drugi zadaci predviđeni planom školovanja. Na primjer, pilot-učenik leti iz Zagreba prema Osijeku. Osnovni zadatak toga leta je trening instrumentalne navigacije, međutim približavanjem Osijeku, pilot-učenik vrši trening prilaza, tako da izvodi jedno slijetanje s produžavanjem i jedno slijetanje sa zaustavljanjem. Taj let rezultira tipičnim letom na ruti, ali s jednim dodatnim LTO ciklusom. S tim na umu, množi se prikladan broj LTO ciklusa po letu s brojem

letova u pojedinom profilu. U svakom letu, 10 minuta se u prosjeku troši na taxiranje po tlu, prema dosadašnjem iskustvu pilota-učenika s kojima je obavljen informativan razgovor. To vrijeme je pomnoženo s brojem letova čime izračunavamo ukupno vrijeme potrošeno na taxiranje pojedinog zrakoplova tokom godine (Tablica 9).

*Tablica 9. Vrijeme provedeno u taxiranju u jednoj godini*

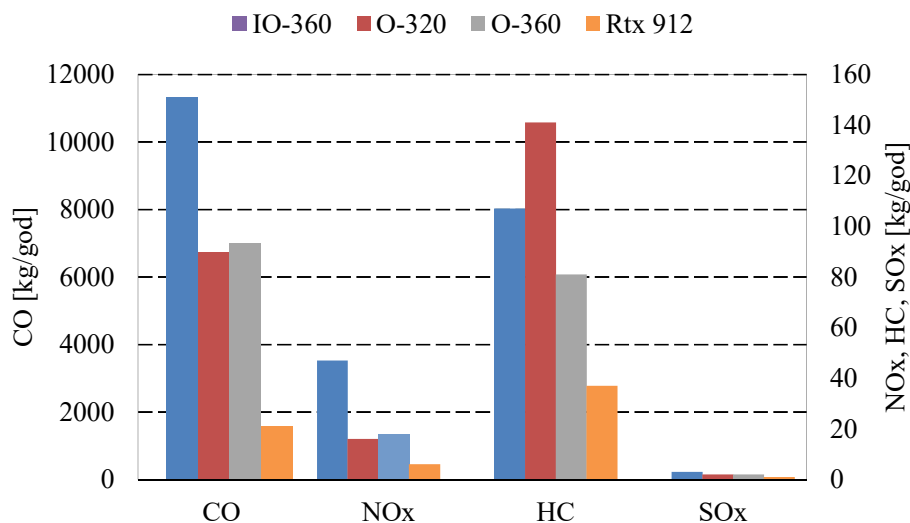
<b>Registracija</b>	<b>vrijeme u satima</b>
DAD	48:49
DAS	42:23
DMB	16:31
DZG	42:03
DIG	39:03
NIR	37:32
PAA	14:28
PAB	9:24
$\Sigma$	250:13

To vrijeme je oduzeto od ukupnog vremena naleta pojedinog zrakoplova, dok je ostatak naleta zrakoplova podijeljen u faze leta prema utvrđenim tipičnim profilima leta, što je objašnjeno u prethodnom poglavlju na primjeru jednog zrakoplova. Nakon provedenog proračuna za sve zrakoplove flote HZNS-a, procijenjene su emisije onečišćivača zraka i potrošnja goriva pojedinih zrakoplova i cijele flote za 2016. godinu. Rezultate predložuje Tablica 10.

*Tablica 10. Emisije i potrošnja goriva pojedinih zrakoplova te emisije i potrošnja goriva cijele flote HZNS-a [kg/god]*

<b>Zrakoplov</b>	<b>Motor</b>	<b>Potrošnja goriva</b>	<b>Emisija CO</b>	<b>Emisija NO<sub>x</sub></b>	<b>Emisija HC</b>	<b>Emisija SO<sub>x</sub></b>
<b>DAD</b>	IO-360	11051,1	11319,5	47,5	107,3	3,0
<b>DAS</b>	O-320	8542,3	9114,3	22,8	194,5	2,4
<b>DMB</b>	O-320	4061,3	4387,2	10,2	88,7	1,1
<b>DZG</b>	2x O-360	13069,2	14019,5	36,8	163,7	3,2
<b>DIG</b>	Rotax 912S	3229,2	3221,0	13,1	75,5	0,9
<b>NIR</b>	Rotax 912	2132,5	2120,0	8,6	49,9	0,6
<b>PAA</b>	Rotax 912	624,5	620,4	2,4	14,9	0,2
<b>PAB</b>	Rotax 912	358,6	354,4	1,4	8,5	0,1
<b>Σ</b>		<b>43068,7</b>	<b>45156,3</b>	<b>142,8</b>	<b>703,0</b>	<b>11,5</b>

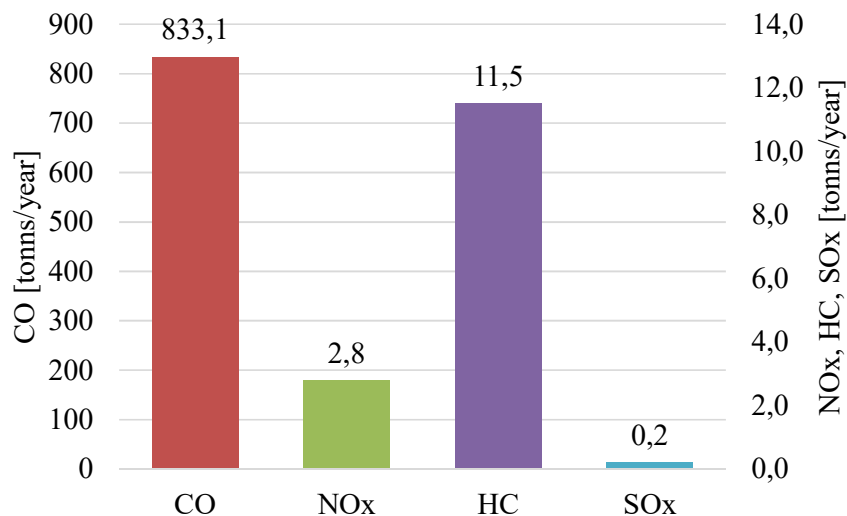
Prosječne emisije po vrsti motora predočene su dijagramom kojeg prikazuje Slika 7. Za motore Lycoming O-320 i Rotax 912 kojih operater ima više od jednog u floti, prosječna vrijednost naleta aviona s tim motorom je uzeta u obzir kod izračuna.



Slika 7. Prosječne godišnje emisije zrakoplovnih motora u floti HZNS-a

#### 4.2. Ukupne emisije zrakoplova generalne avijacije u RH

Iz izračuna emisija HZNS-a, izračunate su prosječne emisije iz jednog prosječnog zrakoplovnog klipnog motora u RH. Ti prosječni podaci za jedan motor, pomnoženi s ukupnim brojem od 125 zrakoplovnih klipnih motora u Republici Hrvatskoj daju prve procjene o ukupnim emisijama iz generalne avijacije u Republici Hrvatskoj, a prikazuje ih Slika 8.



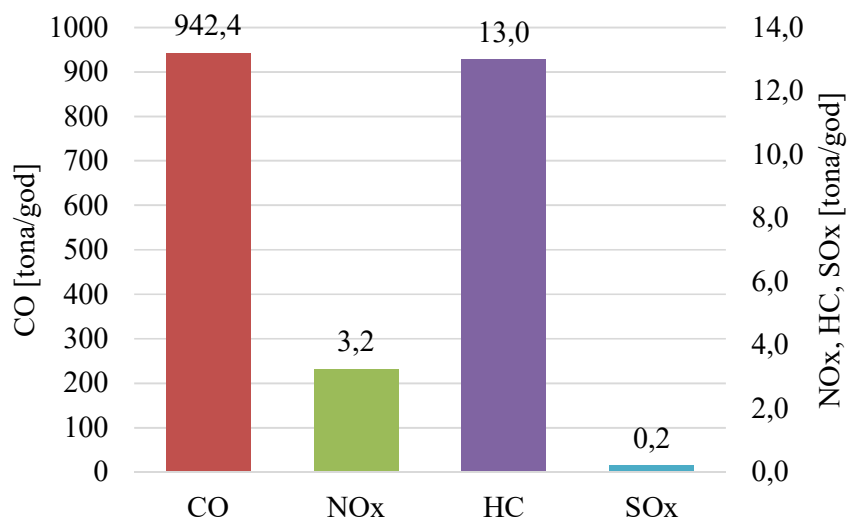
Slika 8. Procjena ukupnih emisija zrakoplova generalne avijacije u RH opremljenih klipnim motorima – na temelju prosječne emisije motora

U svrhu potvrđivanja rezultata, proveden je kompleksniji proces izračuna ukupnih emisija. Umjesto izračuna prosječne emisije jednog motora iz flote HZNS-a, podaci o njihovom naletu projicirani su na druge operatore, tako da se u izračun uključe i emisijski faktori svih tipova motora iz registra, što bi trebalo povećati točnost izračuna. Emisijski faktori koji nisu bili dostupni iz literature, procijenjeni su usporedbom sličnih motora. Na primjer, emisijski faktori motora Lycoming IO-540 nisu dostupni u literaturi, ali su izračunati množenjem poznatih emisijskih faktora za motor Lycoming IO-360 [11] s faktorom proporcionalnosti 1,5. Taj faktor jednak je omjeru broja cilindara tih dvaju motora – 6:4. Postupak izračuna tog dijela prikazuje Tablica 11. Tim izračunom dobivamo dovoljno točne emisijske faktore, a takav izračun je opravdan jer su ti motori vrlo slični u konstrukciji s jednakim provrtom i hodom klipa, a različitim brojem cilindara što ima za posljedicu različiti obujam motora.

*Tablica 11. Primjer procjene nepoznatih emisijskih faktora i potrošnje goriva*

	<b>IO-360 (EPA) [kg/h]</b>	<b>IO-540 (procjena) [kg/h]</b>
<b>Gorivo</b>	46,7	x 1,5 = 70,05
<b>CO</b>	56	x 1,5 = 84
<b>NO<sub>x</sub></b>	0,093	x 1,5 = 0,140
<b>HC</b>	0,469	x 1,5 = 0,704
<b>SO<sub>x</sub></b>	0,01	x 1,5 = 0,015

Takav izračun proveden je za svaki zrakoplovni klipni motor koji se koristi u generalnoj avijaciji u Republici Hrvatskoj. Nakon toga, ukupne emisije izračunate su zbrajanjem emisija iz svih motora, a rezultate prikazuje Slika 9.

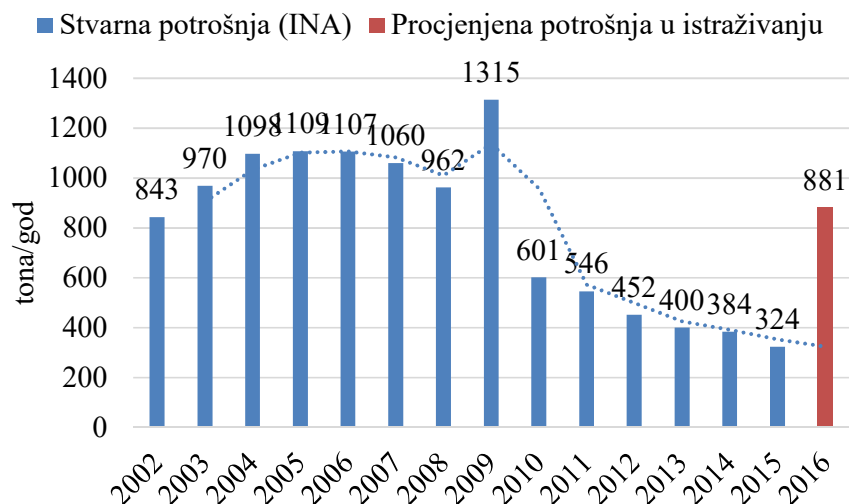


*Slika 9. Procjena ukupnih emisija zrakoplova generalne avijacije u RH opremljenih klipnim motorima – na temelju izračuna emisijskih faktora za sve korištene motore*

Vrijednosti koje prikazuju Slika 8 i Slika 9 pokazuju da oba načina zadnjeg koraka u izračunu daju slične rezultate. Rezultati bazirani na korištenju dostupnih i izračunu nedostupnih emisijskih faktora za sve korištene motore pokazuju povećanje od 13,1 % emisija ugljikovog monoksida (CO), 17 % povećanje emisija dušikovih oksida (NO<sub>x</sub>) te povećanje od 13 % u emisijama ugljikovodika (HC). Emisije sumporovih oksida (SO<sub>x</sub>) jednake su u oba izračuna.

#### **4.3. Potrošnja goriva i emisije olova**

Zrakoplovni klipni motori kao gorivo najčešće koriste AVGAS 100LL (engl. *AViation GASoline 100 Low Lead*). Neki zrakoplovni klipni motori smiju koristiti uobičajen benzin namijenjen za cestovna vozila, ali to gorivo je rijetko dostupno na aerodromima tako da većina zrakoplova koristi AVGAS 100LL. Količina tog goriva stavljenog na hrvatsko tržište između 2002. i 2015. godine prikazuje Slika 10. Te podatke je ustupila INA. Za 2016. godinu još nema službenih podataka, a na slici je prikazana procijenjena potrošnja goriva koja je izračunata u ovom istraživanju.



Slika 10. Potrošnja goriva AVGAS 100LL

Razlika između kretanja potrošnje prethodnih godina i potrošnje goriva izračunate u istraživanju za 2016. godinu je relativno velika, odnosno dva do tri puta veća, zbog analiziranja operatera za kojeg se pretpostavlja da je iznad prosječno aktivan. Zbog toga izračunate vrijednosti treba uzeti kao maksimalne moguće u slučaju da su svi zrakoplovi vrlo aktivni tokom cijele godine kao što su aktivni zrakoplovi Hrvatskog nastavnog zrakoplovnog središta. Očekivane realistične vrijednosti trebale bi slijediti trend pada kao prošlih godina ili pak ostati na istoj razini kao 2015. godine.

Emisija olova iz zrakoplovnih klipnih motora posljedica je korištenja AVGAS 100LL goriva. Iako sam naziv sugerira nisku razinu olova (engl. *Low Lead*) u gorivu, to gorivo i dalje sadrži velike količine olova u usporedbi sa suvremenim bezolovnim gorivima namijenjena cestovnim vozilima. Olovo se u gorivo počelo dodavati nakon otkrića da sprečava pojavu detonantnog izgaranja. Zrakoplovni klipni motori opremljeni su najčešće s dvije svjeće po cilindru, prvenstveno zbog pouzdanosti koja je osnovni zahtjev sigurnog leta zrakoplova. Kao i ostali sustavi, i sustav paljenja smjese goriva i zraka u zrakoplovnim klipnim motorima je udvostručen. Zbog širenja dviju fronta paljenja u cilindru, veća je vjerojatnost pojave detonantnog izgaranja, međutim dodatak olova u gorivu neutralizira taj problem. Prema aktualnim normama, AVGAS 100LL gorivo smije sadržavati najviše 0,56 grama tetraetilnog olova po litri goriva [12], a gustoća goriva je 0.718 kg/L [12]. Prema sljedećoj formuli računamo maseni udio olova u gorivu:



$$w_{\text{Pb}} = \frac{m_{\text{Pb,gorivo}}}{\rho_{\text{gorivo}}}.$$

S uvrštenim vrijednostima, maseni udio tetraetilnog olova u kilogramu goriva iznosi

$$w_{\text{Pb}} = \frac{0,56 \text{ g}_{\text{Pb}}/\text{L}_{\text{goriva}}}{0,718 \text{ kg}_{\text{goriva}}/\text{L}_{\text{goriva}}} = 0,7799 \text{ g}_{\text{Pb}}/\text{kg}_{\text{goriva}}.$$

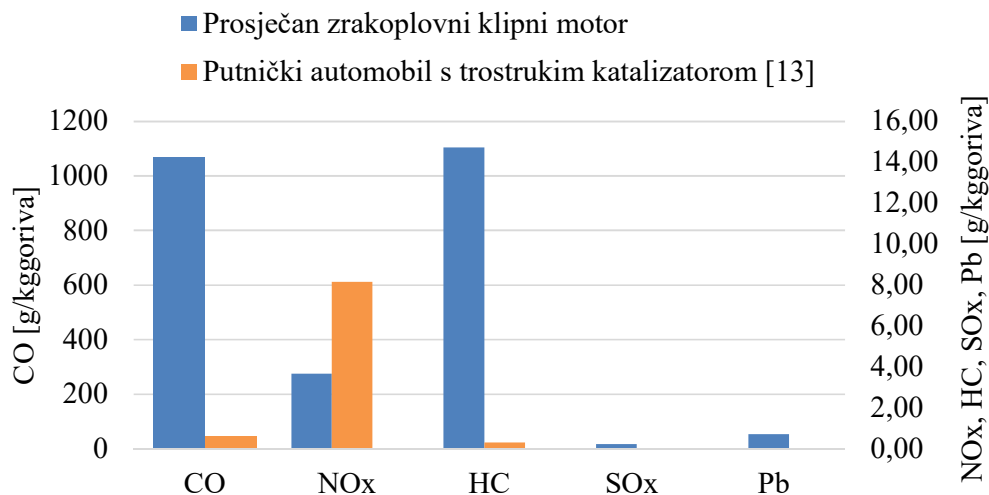
Od tog iznosa, pretpostavlja se da 5 % olova ostaje u motoru u obliku raznih naslaga, a ostatak se ispušta u okoliš [2]. Iz toga razloga, novorazvijeni motori certificirani su za rad s uobičajenim bezolovnim benzinom za cestovna vozila što im omogućuje duže servisne intervale. S druge strane, to znači da statistika potrošnje goriva AVGAS 100LL ne uključuje i dio potrošnje benzinskih goriva za cestovna vozila koji koriste neki zrakoplovi. Prema tome, primjetan kontinuiran pad potrošnje AVGAS 100LL goriva, koji jasno prikazuje Slika 10, rezultat je pada aktivnih zrakoplova i pilota te korištenja benzinskih goriva za cestovna vozila za pogon zrakoplova. To je povoljno s ekološkog aspekta, no potrebna su daljnja istraživanja o upotrebi bezolovnih goriva u zrakoplovnim klipnim motorima kako bi se pokazalo kod kojih se motora može koristiti bezolovno gorivo, bez utjecaja na pouzdanost motora. Za promatrano razdoblje od 2002. do 2015. godine, prosječna godišnja potrošnja zrakoplovnog goriva iznosi oko 800 tona. Uzimajući u obzir i 5 % olova koji ostaje u motoru, zrakoplovi s klipnim motorima su u prosjeku u razdoblju od 2002. do 2015. godišnje ispuštali

$$m_{\text{Pb}} = \left( 0,7799 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}_{\text{Pb}}}{\text{kg}_{\text{goriva}}} \times 800 \times 10^3 \text{ kg}_{\text{goriva}} \right) \times 0,95 \approx 593 \text{ kg}_{\text{Pb}}.$$

#### **4.4. Izračun prosječnih emisijskih faktora i usporedba sa suvremenim cestovnim vozilima**

Iz vrijednosti koje prikazuje Slika 9, izračunati su emisijski faktori prosječnog zrakoplovnog klipnog motora u Republici Hrvatskoj te su uspoređeni s emisijskim faktorima suvremenog putničkog automobila opremljenog trostrukim katalizatorom [13]. Slika 11 prikazuje vrijednosti iz kojih se može vidjeti da zrakoplovni klipni motor ispušta 24 puta više ugljikova monoksida i 50 puta više ugljikovodika od putničkog automobila.

Emisije dušikovih oksida su dva puta manje kod prosječnog zrakoplovnog motora. Emisije sumporova oksida su minimalne u oba slučaja, a emisije olova su jednake nuli kod cestovnih vozila, a kod zrakoplovnih motora u prosjeku iznose  $0,7277 \text{ g}_{\text{Pb}}/\text{kg}_{\text{goriva}}$  pri čemu je uzeto u obzir spomenutih 5 % olova koje se zadržava u zrakoplovnom motoru.



Slika 11. Usporedba emisijskih faktora suvremenog automobila i zrakoplova generalne avijacije

Toliko veće emisije ugljikovog monoksida i ugljikovodika posljedica su nepostojanja sustava automatskog upravljanja motorom te nepostojanja bilo kakvog sustava obrade ispušnih plinova, koji u suvremenim cestovnim vozilima CO i HC kemijskim reakcijama pretvara u  $\text{CO}_2$  i vodenu paru. Nadalje, zrakoplovi s klipnim motorima često rade s bogatom smjesom zbog zahtjeva na pouzdanost. Smjesa se postavlja na potpuno bogatu (engl. *full rich*) kod polijetanja te se osiromašuje tek iznad 914 metara (3000 stopa), pomoću upravljačke poluge smjese u kabini. Zbog bogate smjese, gorivo ne može u potpunosti izgorjeti u ugljikov dioksid, već formira otrovni ugljikov monoksid. S druge strane, klipni motori suvremenih cestovnih vozila rade sa stehiometrijskom smjesom koja osigurava dovoljno kisika za potpuno izgaranje goriva.

Zanimljiva je vrijednost emisijskog faktora za dušikove dioksidi. Veće emisije dušikovih oksida kod motora suvremenih automobila uzrokovane su smanjivanjem obujma motora (engl. *downsizing*) koje se provodi radi bolje specifične snage i emisija  $\text{CO}_2$ , ali ima također i za posljedicu povišenje temperature izgaranja što naposljetku dovodi do većih emisija dušikovih oksida [14]. Zrakoplovni motori su većinom starije

konstrukcije i velikih obujma, koje se ponovo radi pouzdanosti neznatno mijenjaju kroz nekoliko desetljeća, pa su zato kod njih emisije  $\text{NO}_x$  i dalje relativno niske. Emisije sumporovih oksida i olova ovise prvenstveno o korištenom gorivu. Suvremena goriva za cestovna vozila su bezolovna i bezsumporna. Od 2009. godine, količina sumpora u dizelskim i benzinskim gorivima ograničena je na 10 ppm (engl. *parts per million*) [15] pa su i emisije njihovih spojeva jednake nuli, dok olova u gorivima namijenjenim zrakoplovnim klipnim motorima još uvijek ima, kao što je objašnjeno ranije.

## 5. ZAKLJUČAK

U ovom radu procijenjene su emisije zrakoplova generalne avijacije u Republici Hrvatskoj na temelju dostupnih podataka o količini i aktivnosti zrakoplova. Konačni rezultati izračunati su na dva načina u svrhu samoprovjere te su pokazali slične vrijednosti, odnosno rezultati su u istom redu veličina. Dobiveni rezultati uspoređeni su s emisijama iz suvremenih cestovnih vozila. Na temelju provedenog istraživanja i proračuna, može se zaključiti da je za preciznije analize prvenstveno potreban detaljniji Registar civilnih zrakoplova, s dodanim službenim podacima o plovidbenosti i pogonskom sustavu svakog zrakoplova. Također za preciznije rezultate, potrebna je obuhvatnija analiza podataka o naletu od više operatera. Emisijski faktori dostupni su za relativno velik broj zrakoplovnih motora, no dodatnim uredbama kojima bi se proizvođače obvezalo na mjerenje i objavljivanje službenih emisijskih faktora za njihove motore, moglo bi se lako usporediti motore s obzirom na njihove emisije te bi se praćenje emisija zrakoplovnih klipnih motora pojednostavilo. Rezultati su pokazali znatno više emisijske faktore zrakoplova u usporedbi sa suvremenim putničkim vozilima, ali uzimajući u obzir veličinu svake od tih grupa, emisije istraživanih zrakoplova čine vrlo mali udio u ukupnim emisijama u Republici Hrvatskoj. Zrakoplovni klipni motori trebali bi se opremiti sustavima obrade ispušnih plinova i složenijim sustavima upravljanja parametrima rada motora čime bi se smanjile ekstremne vrijednosti emisija ugljikovog monoksida i ugljikovodika.

## LITERATURA

- [1] EEA, Explaining road transport emissions, EEA, Copenhagen, 2016, ISBN 978-92-9213-722-9
- [2] Jeremy Heiken; Airport Cooperative Research Program; Transportation Research Board; National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, Quantifying Aircraft Lead Emissions at Airports, The National Academies Press, USA (2015) ISBN 978-0-309-43255-9
- [3] Izvješće o inventaru stakleničkih plinova na području Republike Hrvatske za razdoblje 1990. – 2010. (NIR 2012), Zagreb, 2012, pp. 61
- [4] Hrvatski registar civilnih zrakoplova, (01-2017) [http://www.ccaa.hr/english/popis-registriranih-zrakoplova\\_101](http://www.ccaa.hr/english/popis-registriranih-zrakoplova_101)
- [5] Pravilnik o sadržaju i načinu vođenja Hrvatskog registra civilnih zrakoplova, NN 137/2012
- [6] Hrvatski registar civilnih zrakoplova, (10-2010)  
<http://hidra.srce.hr/arhiva/1224/60609/www.ccaa.hr/UserDocsImages/dokumenti/98/Hrvatski%20registar%20civilnih%20zrakoplova%2001%2010%202010.pdf>
- [7] Agencija za istraživanje nesreća u zračnom, pomorskom i željezničkom prometu – Izvješća u zračnom prometu, <http://www.azi.hr/reports.aspx?id=1>
- [8] Operators manual for Rotax engine type 912 series, (2010), [http://aquila-aviation.de/fileadmin/pdf/en/service/Manuals/Rotax\\_english/OM\\_912\\_issue2.pdf](http://aquila-aviation.de/fileadmin/pdf/en/service/Manuals/Rotax_english/OM_912_issue2.pdf)
- [9] Z. Lulić, I. Mahalec, D. Kozarac, Klipni motori, Interna skripta (2010)
- [10] EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2016, Luxembourg (2016), ISBN 978-92-9213-806-6
- [11] Compilation of Air Pollution Emission Factors, Volume II: Mobile Sources (1985)  
<https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/2000KL19.PDF?Dockey=2000KL19.PDF>
- [12] Shell AVGAS 100LL, Typical Characteristics, (1998)  
[http://www.shell.com.au/motorists/shell-fuels/msds-tds/\\_jcr\\_content/par/textimage\\_278c.stream/1468561712721/42cc39fc0b31146bc1c4d344c08422206521206f80d031b5f89f9b697c327c81/avgas-100ll-pds.pdf](http://www.shell.com.au/motorists/shell-fuels/msds-tds/_jcr_content/par/textimage_278c.stream/1468561712721/42cc39fc0b31146bc1c4d344c08422206521206f80d031b5f89f9b697c327c81/avgas-100ll-pds.pdf)
- [13] Emission Inventory Guidebook: Road transport, (1999) ppB710-14
- [14] Automotive World, Engine downsizing: keeping ICEs at motoring's heart, (2012)
- [15] ICCT, A technical summary of Euro 6/VI vehicle emission standards, (2016)